利用降落影像序列实现嫦娥三号系统着陆点高精度定位

贾阳^①, 刘少创^②, 李明磊^{②*}, 李群智^①, 彭松^①, 温博^①, 马友青^③, 张烁^④

① 中国空间技术研究院, 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;

② 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101;

③ 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079;

④ 武汉大学测绘学院, 武汉 430079

* 联系人, E-mail: minglei_li@126.com

2013-12-24 收稿, 2014-04-03 接受, 2014-05-28 网络版发表

摘要 准确确定嫦娥三号着陆器的着陆点是圆满完成嫦娥三号任务的一个重要标志, 也是着陆器和巡视探测器开展后续科学探测任务的重要基础. 本文通过对嫦娥三号着陆器降落相机获取的降落影像与嫦娥二号获取的着陆区高分辨率 DOM 影像进行联合处理, 利用 SIFT 特征匹配、图像单应变换和立体视觉测量等技术, 实现了嫦娥三号着陆器着陆点的高精度定位, 该定位结果为遥操作系统对巡视探测器实施高效可靠的任务规划和指导科学目标探测提供了重要支持.

关键词

降落影像
嫦娥三号系统
着陆点定位
单应变换
立体视觉

北京时间 2013 年 12 月 14 日 21 时 11 分, 嫦娥三号月球探测器的着陆器携带巡视探测器在月球“虹湾”着陆区成功着陆. 此后, 成功实施了“两器分离”和“两器互拍”等关键任务, 这标志着我国圆满完成嫦娥三号月球探测任务, 成为世界上继美国和前苏联后第三个实现月球软着陆的国家. 根据任务要求, “玉兔号”月面巡视探测器将在两器分离后的 90 天的行驶周期内巡航达到平方千米级范围, 着陆点位置信息将是建立局地“北-东-地”坐标系系统的重要依据, 并且将局地坐标系附合到月球坐标系中, 为巡视探测器的任务规划和科学探测提供位置服务信息.

为确保完成嫦娥三号探测任务, 2010 年 10 月 1 日发射的嫦娥二号(CE-2)月球探测器在经过多次变轨后, 获取了高分辨率的全月球影像图和虹湾区域高清晰影像. 嫦娥二号月球探测器和美国的月球勘测轨道器计划(the Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)公布的高分辨率月表数字地形图, 为嫦娥三号任务中探测器的位置信息服务提供了底层图像支持所需的基础数据, 可直接服务于着陆器和巡视探测器在

月面着陆过程的初始定位和导航需求. 嫦娥三号系统设计依据软着陆条件要求将虹湾地区选为着陆区域, 被选着陆区范围在北纬 42.6°~45.6°, 西经 34.6°~18.2°之间, 南北长约 91 km, 东西宽约 356 km. 2012 年 2 月 16 日, 国家国防科技工业局发布了嫦娥二号月球探测器获得的分辨率为 7 m 的全月球影像图^[1]. 嫦娥二号在虹湾地区分 2 次覆盖获取到 1.5 m 分辨率 32 轨影像数据, 平均轨道高度 17.8~17.7 km, 数据幅宽 6144 个像素. 图 1 为 7 m 分辨率虹湾正射影像图, 其中的条带影像为本次着陆点所在的 CE2-0236 号 1.5 m 分辨率正射影像图.

由于嫦娥三号月球探测器动力下降过程是一个时间短、速度变化快的过程, 无法依靠地面实时控制. 对此, 探测器制导导航与控制(GNC)系统设计了多种特定敏感器实施对月测速、测距和地形识别, 利用基于对月测速、测距和地形识别的敏感器自主实现测控. 姿态和轨道的确定是利用太阳敏感器、星敏感器、惯性测量单元以及测距敏感器、测速敏感器和图像敏感器来完成^[2]. 任务中使用甚长基线干涉测量(very

引用格式: 贾阳, 刘少创, 李明磊, 等. 利用降落影像序列实现嫦娥三号系统着陆点高精度定位. 科学通报, 2014, 59: 1838–1843

Jiang Y, Liu S C, Li M L, et al. Chang'E-3 system pinpoint landing localization based on descent image sequence (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2014, 59: 1838–1843, doi: 10.1360/N972014-00020

图1 (网络版彩色)虹湾着陆区示意图
嫦娥二号 7 m 分辨率影像

long baseline interferometry, VLBI) 技术对着陆器进行跟踪定位. VLBI 具有高精度、高分辨率等特点, 在国内外深空探测中得到了广泛的应用^[2-4]. 但是, 利用 VLBI 对在地外天体上着陆的着陆器和开展巡视探测的巡视器的导航定位方面存在着精度不高的问题. 利用巡视器携带的双目相机进行立体匹配制图^[5-8], 具有地形恢复精度高和定位准确的特点, 但无法满足宏观定位需求. 为了提高着陆器和巡视探测器的定位精度, 国内外的多个机构均以此为目标开展了相关的研究工作, 并提出各自的解决方案, 其中基于降落影像的定位技术^[9-13]是解决这一问题的有效途径之一, 如: 美国的“勇气号”和“机遇号”火星车在 2004 年成功登陆火星, 其中的降落影像运动估计系统 (descent image motion estimation system, DIME) 为避免下降过程中安全气囊因水平速度过快而碰撞破裂起到重要的作用, 该系统发挥了影像处理的功耗低、算法效率高等优点, 充分印证了降落影像在解决着陆器高精度定位方面的重要价值.

本文利用嫦娥三号着陆器动力下降过程中, 着陆器携带的降落相机获取的降落影像实现了嫦娥三号着陆器的高精度定位. 在解决着陆器定位时, 针对地形变化高度相对成像距离比值较小的实际情况, 建立成像面对应地面水平的约束条件, 对图像进行单应变换, 实现下降影像序列拼接. 同时根据 VLBI 提供的初始位置数据划定出降落点所在的 CE2 号虹湾地区高分辨率正射影像条带, 最终将下降镶嵌影像与 CE2 影像实现配准. 根据悬停阶段成像像幅中心确定着陆点初值, 在巡视器着陆后导航相机对特征地物成像, 利用立体视觉三角测量实现交会测距, 确定并验证了利用着陆器下降影像进行着陆器定位结果的精度及可靠性.

1 着陆点定位方法

本文在确定嫦娥三号着陆器初始位置时, 以降落影像序列为纽带, 联合卫星影像和月球车影像, 使用序列影像抽帧、影像降采样、特征匹配、图像拼接与 CE2 底图配准等步骤, 并通过导航相机影像交会测距, 最终对定位结果进行确定和验证.

(i) 特征匹配. 在嫦娥三号着陆器动力下降过程中, 随着着陆器高度的降低, 降落相机获取的下降影像数据的空间分辨率也在不断提高, 影像尺度变化最为明显. 一种可靠的特征选择机制对特征匹配是非常重要的, 本文使用 SIFT 方法进行特征匹配. 最早 Lindeberg^[14]进行了尺度选择问题的研究, 首次提出高斯拉普拉斯(LoG)函数的极值点作为兴趣点. Lowe^[15]在此基础上提出在一个八度集合上计算高斯差分滤波器建立金字塔结构, 在此三维结构中寻找极值, 通过二次拟合计算特征点亚像素级的空间和尺度位置. 特征描述时使用 128 维归一化特征向量来记录特征点信息, 匹配时以特征向量之间的欧式空间距离为依据进行相似性排序, 通过设定阈值提取匹配结果. 这种方法有效地克服了尺度变换和影像旋转的影响, 能够针对下降影像序列有效地提取出具有可重复性和稳定性的特征点, 达到理想的匹配效果.

(ii) 图像镶嵌. 由于落月点选择地势平坦区域, 所以本文建立约束条件: 3 km 后下降影像的成像面对应地面为平面. 由此约束可以引出序列影像间的单应性对照. 计算中使用的成像模型为透视投影模型,

$$\tilde{x}_s = P \cdot p_w = K[R|t]p_w, \quad (1)$$

其中 $\tilde{x}_s$ 为相面投影坐标, p_w 是已知的 3D 世界坐标, 而摄像机矩阵为 $P=K[R|t]$.

着陆器降落过程中, 降落相机在 2 个不同位置拍摄两幅图像, 假设已知物方空间中某一点 X_i 对应参考图像 I^0 的深度信息, 可以计算出该点的空间坐标, 再由目标图像 I^1 的投影映射可以得出该点在目标图像 I^1 中的位置, 约去深度信息, 推出两幅图像对应同一平面具有映射公式如下:

$$\tilde{x}_i^1 \sim H\tilde{x}_i^0, \quad (2)$$

$$\lambda \begin{bmatrix} u_i^1 \\ v_i^1 \\ 1 \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} \\ h_{20} & h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i^0 \\ v_i^0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} u_i^1 = \frac{h_{00}u_i^0 + h_{01}v_i^0 + h_{02}}{h_{20}u_i^0 + h_{21}v_i^0 + h_{22}}, \\ v_i^1 = \frac{h_{10}u_i^0 + h_{11}v_i^0 + h_{12}}{h_{20}u_i^0 + h_{21}v_i^0 + h_{22}}, \end{cases} \quad (4)$$

其中 H 为 3×3 非奇异单应性矩阵, 单应变换有 8 个自由度, 每组对应点可列 2 个方程, 只要已知 4 组以上对应点, 就可以根据最小二乘原理计算出单应矩阵的元素. 在 (i) 节中, 特征选择结果会包含错误匹配, 这里通过 RANSAC (Random Sample Consensus) 剔除错误匹配结果. RANSAC 方法^[16,17]是通过一定数量循环计算, 随机选取 4 组特征匹配点对计算一组单应矩阵 H . 根据 H 计算映射关系将其他特征点对照划分为 inlier 和 outlier, 通过循环最后选出 inlier 数目最多的一组结果作为 H 的计算值, 并剔除了 outlier 错误匹配点.

待镶嵌的图像根据计算出的 H 矩阵进行逐像素的映射计算, 找到其在参考图像同一坐标系下的映射位置, 从而实现镶嵌操作. 由于映射计算的位置可能是非整数的像素结果, 实际操作中采用最邻近采样方法进行像素点的重采样.

(iii) 确定着陆点位置. 着陆器最后自由落体阶段图像视场范围可根据

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{W_{\text{img}}}{2f} = \frac{W_{\text{field}}}{2H} \quad (5)$$

计算. 着陆器的着陆架展开跨度约为 4.38 m, 降落相机在 4 m 高度时的成像视场宽度为 3.35 m, 因此可以设 4 m 成像的视场中心点位为落点位置在图上的初值.

然后, 利用导航相机立体像对前方交会进行三角测量, 解算出正射图上选定的目标点 p_i 距离导航相机的像空间直角坐标系的直线距离 d_i , 根据初始值估计结果和公式(6), 使用最小二乘方法最小化拟合距离差, 得出像空间坐标系原点的实地位置值 P_{camera} .

$$P_{\text{camera}} \sim \min \sum_i (\|P_{\text{camera}} - p_i\| - d_i), \quad (6)$$

$$P_{\text{rover}} = M_{\text{CR}} \cdot R_{\text{structure}} \cdot P_{\text{camera}}. \quad (7)$$

最后, 如公式(7)所示, 根据成像时结构机构姿态矩阵 $R_{\text{structure}}$ 和导航相机在巡视探测器本体下的安装矩阵 M_{CR} , 可以由 P_{camera} 换算出巡视探测器本体坐标系中心 P_{rover} 的坐标值, 完成定位解算.

2 实验与分析

探测器着落阶段获取的降落影像是连接卫星影

像和月球车影像的纽带, 本文充分利用我国探月工程中实际获取的 3 种影像信息, 通过摄影测量和数字图像处理等技术实现着陆点在月球坐标系下的精确定位.

2.1 CE-2 卫星影像

为给嫦娥三号探测系统提供可靠的数据支持, 嫦娥二号月球探测器获取了着陆区的高分辨率卫星影像, 通过辐射校正、光度校正、行补齐处理、几何校正处理等得到 1.5 m 分辨率的虹湾地区 DOM 影像. 制图基准采用 D_MOON_2000 基准面, Moon_2000_IAU_IAG 参考椭球, 使用墨卡托投影制图. 数字正射影像 DOM 是对地理影像数据进行投影差改正, 图幅镶嵌剪裁而生成的, 它同时具有几何精度和影像信息. 嫦娥二号 DOM 数据以其精度可靠、信息丰富等特点, 作为嫦娥三号着陆器定位数据分析的背景控制信息, 为嫦娥三号任务规划等提供可靠依据, 并为评价其他数据精度提供参考.

2.2 降落影像处理

嫦娥三号着陆器从 15 km 轨道高度经过主减速段、快速调整段、接近段、悬停段、避障段、缓速段等 6 个阶段的减速, 最终安全着陆至月球表面, 下降过程时间约 690 s, 速度变化范围 1.7 km/s. 降落相机作为最直观的信息获取手段, 在嫦娥三号登月过程中发挥着重要作用, 其部分技术指标如表 1 所示. 在整个下降过程中降落相机成像稳定, 数据质量良好, 为基于影像的初始定位提供了保障.

下降序列影像变化复杂, 观测目标场景具有缩放旋转平移特性, 像元分辨率和幅宽连续变化, 本文分析使用的部分下降序列影像成像情况如表 2 所示.

在距月面 3 km 快速调整阶段之后, 降落相机摄影射线与地面夹角发生快速变换, 由之前约 30°接近水平摄影变换到接近 90°垂直摄影状态. 3 km 高度之后的下降影像观测目标场景具有尺度变化快、旋转缓慢、平移明显、地理信息丰富等特点, 全面反映所观

表 1 降落相机部分技术指标

名称	指标	名称	指标
帧频	10 fps	像幅	1024×1024
光谱范围(nm)	420~780	像元尺寸(μm)	6.7
量化等级	GRAY 8 bit	焦距(mm)	8.594

表2 下降过程成像情况

成像时间(北京时间)	成像高度(m)	幅宽(m)	分辨率(m)
21: 09: 07	785.5	657.2	0.641
21: 09: 23	548.4	458.8	0.448
21: 09: 40	370.5	310.0	0.303
21: 09: 55	139.5	116.7	0.114
21: 10: 24	91.9	76.9	0.070

测目标场景的时空特性. 本文在数据处理时对下降影像进行了降采样, 并对影像中所包含探测器的设备投影进行了掩模滤除处理.

图2给出了对高度为785.5 m处1幅降落影像处理流程图: (a)为原始一帧影像经过降采样后得到的影像; (b)为用于去掉设备影像的掩模模板; (c)为掩模

后的影像; (d)为根据映射变换后得到的与嫦娥二号DOM配准后的影像. 从图2中可以直观地看出, 下降影像信息丰富、成像质量优良、纠正后的影像映射准确、恢复效果理想.

根据第1节中给出的特征匹配和图像镶嵌方法, 降落影像镶嵌效果如图3所示. 其中选用了7幅降落影像, 对应成像高度分别为785.5, 548.4, 370.5, 233.9, 139.5, 119.7, 91.9 m, 并给出了镶嵌后对应应在CE2-0236号1.5 m分辨率正射影像图中的位置, 图中星形标注点标识了着陆器降落点的图上位置.

2.3 导航影像定位解算

嫦娥三号探测器着陆后, 在两器分离前, 巡视器在着陆器顶部对降落点周围环境进行了环视拍照.

图2 降落影像处理流程举例

(a) 降采样后的原始一帧降落影像; (b) 掩膜影像; (c) 掩膜处理后影像; (d) 配准校正后影像

图3 (网络版彩色)七幅降落影像配准拼接结果及与嫦娥二号1.5 m DOM配准示意图

巡视器上安置的双目导航相机基线固定并且标定参数已知, 可以使用双目立体视觉三角测量方法进行交会测距. 嫦娥三号任务前期实验阶段测定了导航相机的各项标定参数和导航相机在巡视器本体体系下的安装矩阵 M_{CR} , 为三角测量提供支持. 文中选取探测器降落后首次拍照获取的 10 对影像中的 4 对进行处理, 拍照时间 2013 年 12 月 15 日 01:49~01:56. 导航相机部分参数如表 3 所示.

图 4 显示了 4 张用来交会测距的月球车导航相机获取的图像(立体像对中的左像), 及已经选定的控制点 $a\sim d$ 和对应的悬停阶段与底图配准后影像中交会方向((e)图). 计算结果中直线距离 d_i 对应各点水平距离分量 d'_i 为 $d'_a=15.888\text{ m}$, $d'_b=13.648\text{ m}$, $d'_c=17.584\text{ m}$, $d'_d=15.896\text{ m}$. 图中射线交点即为探测器本体系原点在正射图上投影位置. 利用月球坐标系下正射影像上着陆点初值和空间分布离散的 4 个点测距结果, 根据公式(6)和(7)可以得到着陆器本体坐

标系的原点在月球坐标系下的准确位置, 结果见表 4.

通过下降影像数据与嫦娥二号获取的 1.5 m 分辨率 DOM 数据的综合处理, 确定嫦娥三号着陆点位置为 19.5126°W , 44.1188°N . 这一坐标位置将作为“玉兔号”月面巡视探测器任务规划及导航定位的起始数据.

3 结论

本文首先通过处理嫦娥三号着陆器所携带的降落相机获取的下降影像数据, 实现了降落影像的高精度镶嵌, 再将镶嵌后的下降影像与 VLBI 数据和嫦娥二号月表 DOM 数据联合处理确定着陆点的初始位置, 最后通过导航相机立体像对交会测距确定着陆点的精确点位. 通过这一方法计算得到: 嫦娥三号探测器着陆点的准确位置为纬度 44.1188°N , 经度 19.5126°W . 这一坐标数据将作为执行后续任务的基础数据, 在着陆器的就位探测和巡视探测器的巡视探测中发挥重要作用.

表 3 导航相机部分参数

名称	指标	名称	指标
像幅	1024×1024	基线长	269.69 mm
左焦距	17.69 mm	量化等级	GRAY 8 bit
右焦距	17.98 mm	CCD 尺寸	0.015 mm

表 4 图像定位结果与通报落点比较

	图像定位结果	VLBI 初值	差值
经度	19.5126°W	19.507°W	0.0056°
纬度	44.1188°N	44.120°N	0.0012°

图 4 (网络版彩色)三角测量选用点及定位结果示意图

(a)~(d)中分别标识出了选取的 4 个控制点 a, b, c, d 点及所在立体像对的左影像; (e) 标识出 4 个控制点在悬停阶段降落影像上的位置

参考文献

1 赵葆常, 李春来, 黄江川, 等. 嫦娥二号月球卫星 CCD 立体相机在轨图像分析. 航天器工程, 2012, 21: 1-7
2 孙泽洲, 贾阳, 张熹. 嫦娥三号探测器技术进步与推动. 中国科学: 技术科学, 2013, 43: 1186-1192
3 曹建峰, 黄勇, 胡小工, 等. USB 与 VLBI 联合确定嫦娥一号卫星撞月点的位置. 宇航学报, 2010, 31: 1724-1729
4 黄勇, 胡小工, 张秀忠, 等. VLBI 应用于 GEO 导航卫星的测定轨. 科学通报, 2011, 56: 1974-1981
5 吴伟仁, 王大轶, 邢琰, 等. 月球车巡视探测的双目视觉里程算法与实验研究. 中国科学: 信息科学, 2011, 41: 1415-1422
6 李明磊, 刘少创, 彭松, 等. 基于改进动态规划法的月面地形三维重建. 光电工程, 2013, 40: 6-11
7 Zhang Z. A stereovision system for a planetary rover calibration, correlation, registration, and fusion. Mach Vision Appl, 1997, 10: 27-34

- 8 Olson C F, Habib A R. Wide-baseline stereo vision for terrain mapping. *Mach Vision Appl*, 2009, 21: 713–725
- 9 刘建军, 任鑫, 邹小端, 等. 利用嫦娥一号卫星受控撞月过程的影像数据进行撞月点定位. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41: 1714–1720
- 10 李金岭, 郭丽, 钱志瀚, 等. 嫦娥一号卫星受控撞月轨迹测量与落月点坐标分析. *科学通报*, 2010, 55: 752–757
- 11 Matthies L, Maimone M, Johnson A, et al. Computer vision on Mars. *Int J Comput Vis*, 2007, 75: 67–92
- 12 Ansar A, Cheng Y. An analysis of spacecraft localization from descent image data for pinpoint landing on Mars and other cratered bodies. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2005, 71: 1197–1204
- 13 Xiong Y, Olson C F, Matthies H. Computing depth maps from descent images. *Mach Vision Appl*, 2005, 16: 139–147
- 14 Lindeberg T. Feature detection with automatic scale selection. *Int J Comput Vis*, 1998, 30: 79–116
- 15 Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int J Comput Vis*, 2004, 60: 91–110
- 16 Lee J J, Kim G Y. Robust estimation of camera homography using fuzzy RANSAC. *Proceedings of the 7th International Conference on Computational Science and Applications*, 2007 August 26–29, Kuala Lumpur, Malaysia, 2007. 992–1002
- 17 Gallo O, Manduchi R, Rafii A. CC-RANSAC: Fitting planes in the presence of multiple surfaces in range data. *Pattern Recog Lett*, 2010, 32: 403–410

Chang'E-3 system pinpoint landing localization based on descent image sequence

JIA Yang¹, LIU ShaoChuang², LI MingLei², LI QunZhi¹, PENG Song¹, WEN Bo¹,
MA YouQing³ & ZHANG Shuo⁴

¹ Chinese Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

² Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

³ School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

⁴ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Realizing the pinpoint landing localization for the Chang'E-3 system is a symbol of success for this mission, and it is also a basic requirement for the lunar Lander and Rover to carry out the following scientific exploration tasks. In this paper, jointly dealing with the descent image sequence and Chang'E-2 DOM data, an approach based on the images processing techniques, such as SIFT feature matching, homography transportation and stereo vision measurement, is presented to realize the pinpoint localization of the Chang'E-3 system. The localization result is proved to be reliable and accuracy and the result will be a critical component for the Chang'E-3 mission planning and the completion of scientific exploration.

descent image sequence, Chang'E-3 system, landing localization, homography transportation, stereo vision

doi: 10.1360/N972014-00020